基于 DPM-to-VOF 的液滴射流撞壁过程研究

陈青山 [1]，王明军 [1]，田文喜 [1,*]，秋穗正 [1]，苏光辉 [1]
1（西安交通大学核科学与技术学院核反应堆热工水力研究室, 陕西 西安 710049）

摘要 喷淋雾化被广泛应用于核动力设备中，以保证其安全稳定运行。喷淋时，部分液滴会撞击设备壁面，以液膜的形式进行扩展和演变。基于 Fluent DPM-to-VOF 进行了液滴射流撞壁研究，使用两液滴滴落过程实验图像验证了模拟方法的准确性，研究了液滴射流注入速度、入射角度对壁面液膜形态的影响规律，得到了液滴溅射率随入射条件的变化情况，并分析了液滴撞击壁面时重力、表面张力、速度分量等对液膜形态扩展过程、液滴溅射率的影响。研究发现，增大注入速度能加大对液膜的扰动，液膜与壁面的接触面积显著增大，液膜区宽度和高度增加；增大入射角度对液膜形态的改变影响较大，体现在液膜区宽度增加和液膜区高度减小，液膜表面稳定性减低。溅射率随着注入速度和入射角度的增大而增大，其中，入射角度对溅射率的影响更大。

关键词 DPM-TO-VOF；液滴射流撞壁；液膜扩展演变；液滴滴落融合
中图分类号 XX

Study on the Droplet Jet Impingement Process on a Wall Based on DPM-to-VOF

CHEN Qingshan[1], WANG Mingjun[1], TIAN Wenxi[1,*], QIU Suizheng[1], SU Guanghui[1]
1(*Nuclear Thermal-hydraulic Laboratory, School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi 'an Shaanxi, China*)

Abstract: [Background]: Spray atomization is widely used in nuclear power equipment to ensure its safe and stable operation. **[Purpose]:** This study aims to obtain the characteristics of the extended evolution of a liquid film formed by a droplet jet impacting a vertical wall. **[Methods]:** This paper conducted a study on droplet jet impinging on a wall based on Fluent DPM-to-VOF, and validated the accuracy of the simulation method using experimental images of two droplet falling processes. The research investigated the influence of droplet injection velocity and incident angle on the wall liquid film morphology, and obtained the variation of droplet splash rate with incident conditions. Furthermore, the effects of gravity, surface tension, velocity components, and other factors on the expansion process of liquid film morphology and droplet splash rate during droplet impact on the wall were analyzed. **[Results]:** The study found that increasing the injection velocity could enhance the disturbance to the liquid film, significantly increasing the contact area between the liquid film and the wall, as well as increasing the width and height of the liquid film area. Increasing the incident angle had a significant impact on the change of liquid film morphology, reflected in the increase in the width of the liquid film area and the decrease in the height of the liquid film area, leading to decreased stability of the liquid film surface. The splash rate increased with the increase of injection velocity and incident angle, with the incident angle having a greater impact on the splash rate. **[Conclusions]:** The study of jet impingement on the wall can lay the foundation for the subsequent study of wall cooling under the spraying.

Key words: DPM-TO-VOF；Droplet Jet Impingement on Wall；Liquid Film Expansion and Evolution；Droplet Falling and Coalescence

第一作者：陈青山，男，1998 年出生，博士研究生，核反应堆热工水力
通讯作者：田文喜，E-mail: wxtian@mail.xjtu.edu.cn
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

雾化和喷淋在工业、农业、消防和医疗等领域应用广泛，特别是在核电厂和核动力设备中发挥着重要作用。喷淋系统的使用对核动力设备的安全运行和反应堆的完整性有着十分重要的作用[1]，设置了包括堆芯喷淋、稳压器喷淋和安全壳喷淋在内的多个喷淋系统，起到了排出堆芯余热、冷凝蒸汽、降温降压和限制放射性排放等多个功能。在这些喷淋的实际应用场景中，有时会出现液相以液滴的形式撞击壁面、液面和壁膜的情况，典型的例子如稳压器喷淋系统中液滴撞击到稳压器内壁面和稳压器液相空间、安全壳喷淋系统中液滴撞击堆内设备的壁面等。对于此类应用的模拟研究，可以使用一种由离散相（Discrete Particle Model, DPM）到连续相(Volume of Fluid, VOF)的耦合模型，从而精准捕捉到离散液滴进入液面或者撞击壁面、壁膜的过程。

为了实现离散相到连续相的耦合，国内外学者进行了广泛研究，并进行了大量的试验和模拟。Dalili[2]等人利用液滴聚并实验平台进行了多液滴滴落聚并实验研究，观察到粘性液滴在固定钢板上的聚并形成连续相液线和液膜的过程，并预测了线和膜保持连续、发生断裂的条件。Liu[3]等人提出了一种固定网格焓-DPM-VOF 集成算法来求解结冰过程的相间传热问题，并通过两个甘油液滴滴落案例验证了耦合方法的准确性和可靠性，揭示了结冰过程中液滴的形成、运动以及相变、传热的细节。刘栋[4]等人采用 FTM 方法模拟了静止液滴的融合过程，分析了粘性、液滴尺寸和环境因素对融合过程的影响，并发展了 SPH 模型来模拟运动液滴的碰撞融合过程，再现了独立液滴到连续液滴的融合过程。Zhang[5]等人利用 CONVERGE 代码提出了一种拉格朗日-欧拉混合过渡模型，描述了喷淋液滴冷却成膜的全部过程，利用从多个液滴滴落过程的实验数据对模型进行了验证，此外，还对喷雾撞击形成液膜的过程进行了过渡模型和基于颗粒的薄膜模型(TFM)的详细比较。研究人员同样进行了大量的射流撞击研究。Wang[6]等人研究了射流撞击玻璃表面产生连贯水膜时的铺展形态；唐亮[7]等人利用实验研究了倾斜射流撞击壁面形成液膜的关键特征；彭振山[8]等人研究了不同壁面对汽油液滴撞壁结果转捩的影响。

在稳压器喷淋过程中，部分液滴冲击稳压器壁面，并逐渐聚集、铺展成连续的液膜，随后在下游区域收缩、成股的下流。液膜的形态和铺展过程都会影响其与稳压器壁面的传热特性，因此采用合适的数值模拟方法对液滴射流撞击壁面的模拟很有必要。本文基于 DPM-to-VOF (DTV)方法进行了多液滴撞击壁面的模拟计算，并通过两液滴滴落实验的详细情况对模型进行了模型验证。

1 研究方法和理论模型

1.1 DTV 方法

对于射流液滴撞击壁面的研究方法，Fluent 提供了 DTV 方法，可以实现由 DPM 到 VOF 的过渡过程的耦合。DTV 方法在以下两种情形发生转换：

首先，当离散颗粒撞击干燥壁面时，会形成拉格朗日壁膜，当膜高度超过设定的阈值时，DPM 壁膜会转换为 VOF 液相。

其次，当离散颗粒接触到欧拉壁膜的气液界面时，若满足设定的转换标准，DPM 会融入到 VOF 液相中进行转换。

用户可以指定 DPM 到 VOF 的过渡准则，其中包括 VOF 的相体积分数阈值和拉格朗日壁膜转换参数等。如图 1 所示，DPM 粒子与 VOF 液芯接触(a)，在计算网格内，接触的 VOF 相体积分数超过设定的阈值时，粒子的轨迹计算将停止，并转换为 VOF (c)，并同时进行粒子的质量和动量的传递。此外，如果希望将拉格朗日壁膜也转换为 VOF，则可以设定一个膜高度上的阈值。

1.2 理论模型

壁面上的欧拉壁膜的质量守恒方程为：

$$\frac{\partial \rho_l h}{\partial t} + \nabla_s \cdot \left(\rho_l h \overrightarrow{V_l}\right) = \dot{m}_s \quad \#(1)$$

其中，ρ_l 为液体密度，h为液膜高度，$\overrightarrow{V_l}$ 为平均液膜速度，$\dot{m}_s$ 为壁面质量源项。

壁膜的动量守恒方程为：

$$\frac{\partial \rho_l h\overrightarrow{V_l}}{\partial t} + \nabla_s \cdot \left(\rho_l h\overrightarrow{V_l}\,\overrightarrow{V_l} + \dot{D}_V\right) = -h\nabla_s P_L + \rho_l h\overrightarrow{g_\tau} + \frac{3}{2}$$

其中，式(2)左侧分别为液膜的瞬态效应和对流效应，右侧第一项表示气体压力、重力垂直于壁面的分量、表面张力的影响效应，第二项为重力在平行于壁面的分量的影响效应，第三项和第四项为粘性剪切力影响效应，第五项为液滴源项，第六项为表面力效应。

欧拉壁膜模型可以通过改变膜方程的源项来实现 DPM 和 VOF 多相流模型的相互作用。当离散粒子碰撞壁膜被吸收时，粒子的质量和动量会分别添加式(1)、(2)的源项中。

质量源项为：

$$\dot{m}_s = \dot{m}_p \#(3)$$

其中，$\dot{m}_p$ 为离散粒子撞击液膜的流量。

动量源项为：

$$\overrightarrow{\dot{q}_s} = \dot{m}_p\left(\overrightarrow{V_p} - \overrightarrow{V_l}\right)\#(4)$$

其中，$\overrightarrow{V_p}$ 为离散粒子的速度。

当 DPM 离散粒子在撞击壁面时，若壁面上不存在 VOF 连续相，粒子也将被收集形成拉格朗日壁膜。当拉格朗日壁膜聚集并且厚度超过设定的最大阈值时，DTV 模型会使之发生从离散相到连续相的转变，使得积累的拉格朗日液膜颗粒通过 VOF 的形式溶解，质量、动量在两模型之间传递。此外，离散粒子撞击壁膜时也可能出现颗粒反弹和液膜飞溅现象。

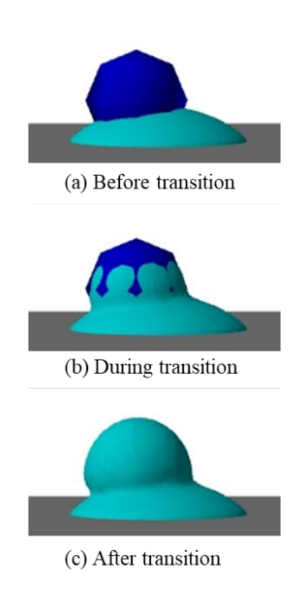


图 1 DTV 转换过程示意图

Fig.1 Schematic Diagram of DTV Transition Process

2　模型验证和边界条件

2.1　DTV 模型验证

在液滴撞击壁面的数值模拟中，VOF 方法能够捕捉液膜的细节过程，但对网格精度要求较高。为了获得一定程度的计算精度，需要大量的高质量网格，这会极大的降低计算速度。相比之下，DPM 模型对网格精细度要求较低，拉格朗日粒子可以被放置在单个大网格中，但是刚性颗粒不便于观察碰撞和融合细节。因此，本研究采用了基于曲率的网格自适应细化方案的 DTV 方法，以平衡计算速度和计算精度，并精确捕捉相界面的演变和液膜铺展细节。

为验证 DTV 方法的可靠性，采用了两液滴滴落融合过程进行验证。液滴材质为 87%的高粘性甘油水液滴[2]，直径 3 mm，密度 1235 kg·m^{-3}。这些液滴以 1.1 m/s 的速度从距离壁面 3.4 mm 的高度滴落。液滴滴落并撞击壁面过程如图 2 所示，在撞击壁面之前，液滴一直以 DPM 离散相的形式存在(a)，撞击壁面形成拉格朗日壁膜(b)，刚性 DPM 颗粒即使撞击壁面也不会发生变形。当壁膜厚度超过设定的转换值时，实现了由 DPM 到 VOF 相的转换(c)，同时质量和动量发生传递，使得 VOF 液滴发生形变 0(d)。

图 2 还展示了在 DPM 到 VOF 过渡过程中的网格细节，基于曲率的网格自适应细化多次触发，形成了贴合 VOF 液面的新的气液边界。同时，在气液界面远离之后，网格粗化也会触发。

将两液滴滴落融合的实验图像和模拟过程进行比较。在第一个液滴滴落在壁面上形成稳定形态后，将第二个甘油水液滴滴下，融合和发展过程如图 3、4 所示，它们中心位置偏移量分别为 0.73 mm 和 3.68 mm。

当离散相颗粒接触 VOF 液相后并达到转换条件后，它们将变为 VOF 液滴并继续下降，与第一个液滴发生相互作用，直到合并达到稳定状态。模拟结果与实验图片[3],[5]吻合较好，证明了 DTV 模型方法的可行性和可信度。

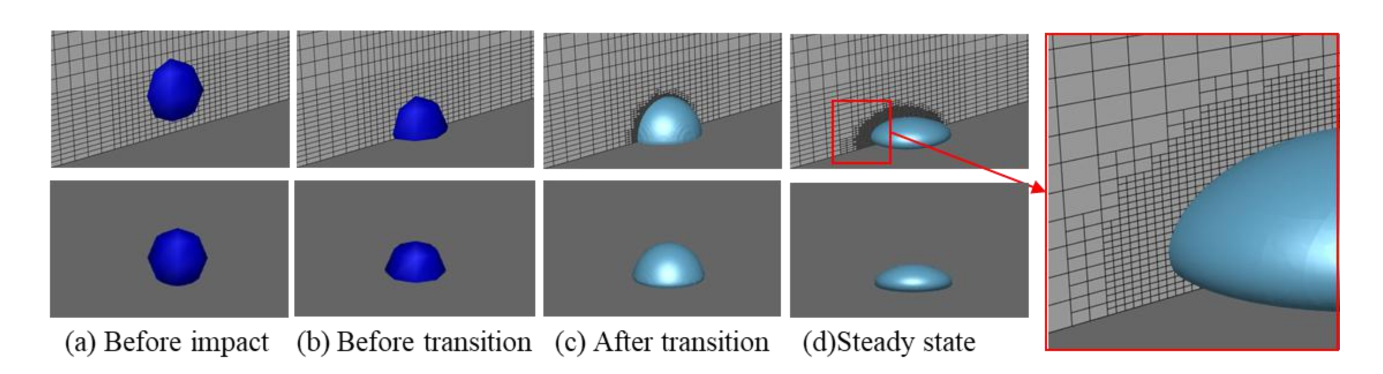


图 2　液滴滴落撞击壁面的转换、演变过程和网格变化情况

Fig.2　Transitions, Evolutionary Processes, and Mesh Changes in Droplet Impacts on the Wall

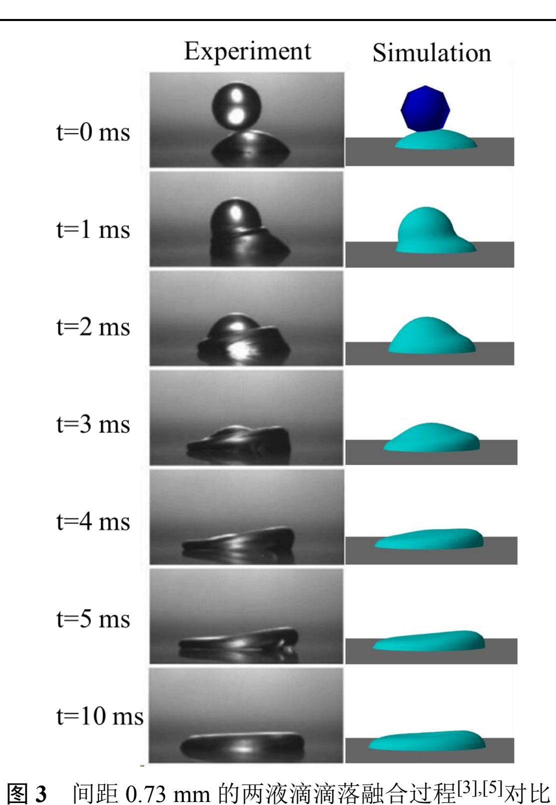


图 3　间距 0.73 mm 的两液滴滴落融合过程[3],[5]对比

Fig.3　Comparison of Droplet Falling and Fusion Processes[3],[5] with a Separation Distance of 0.73 mm

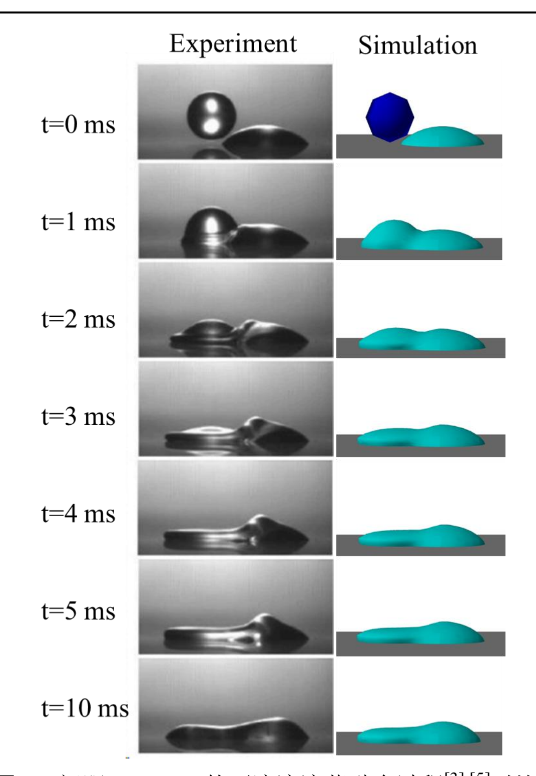


图 4　间距 3.68 mm 的两液滴滴落融合过程[3],[5]对比

Fig.4　Comparison of Droplet Falling and Fusion Processes[3],[5] with a Separation Distance of 3.68 mm

2.2　计算域和边界条件

液滴射流撞击垂直壁面的计算域如图 4 所示，其中高度H=50 mm，宽度L=12 mm，厚度D=3 mm，利用 ICEM 对计算域进行了结构化网格划分，并对壁面进行了网格的局部加密。

计算时，选择 VOF 模型作为两相流模型，RNG $k-\varepsilon$作为湍流模型。选择 single 注入源类型，注射的液滴为液态水，直径为 0.7 mm，密度为 998.2 kg·m^{-3}。粒子速度、流量和入射位置根据不同工况进行设定，以研究不同射流速度、不同射流角度对壁面液膜状态的影响规律。

第一作者：陈青山，男，1998 年出生，博士研究生，核反应堆热工水力
通讯作者：田文喜，E-mail: wxtian@mail.xjtu.edu.cn
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

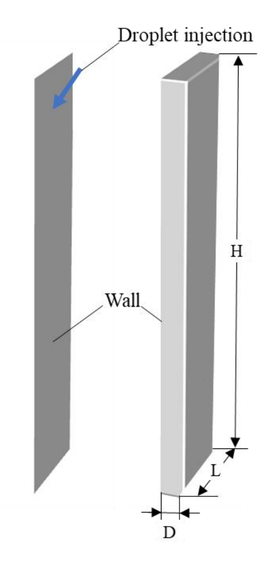


图 5 计算域几何模型

Fig.5 Geometric Representation of the Computational Domain

3 计算结果分析

液滴以不同速度（流量）和角度撞击壁面时，形成的液膜及其扩展演变情况各不相同。本文分析了注入速度和入射角度对液膜扩展演变过程的影响。

3.1 射流撞壁液膜特征

连续液滴以 DPM 颗粒的形式、以一定的角度α和质量流量G_O（入射速度u_O）入射撞击垂直壁面，如图 6，撞击点为 O。DPM 粒子在接触壁面后会发生转换，形成 VOF 液膜，而后续颗粒在接触液体后也会发生转换。由于撞击导致速度方向改变，在惯性的作用下，液膜从撞击点 O 向四周扩展，其中沿着壁面向下的质量流量为G_K形成汇流。此外，部分液滴在撞击壁面后会发生溅射，脱离壁面形成小液滴。

液滴撞击壁面形成液膜的典型铺展情况[9]如图 7 所示。可以看出，液滴撞击壁面后扩展开来；由于能量耗散和壁面粘性作用，液膜动能逐渐减小，重力作用增强，液膜向下扩展，形成长椭圆形的液膜区域(PART I)；在表面张力作用下，液膜逐渐收缩聚拢在节点 K 处；液膜汇聚成股下流，最终形成了汇流区域(PART II)。稳定典型液膜形状类似“蝌蚪”形，其中 H 为液膜区高度，W 为液膜区宽度。

液膜区尺寸是影响换热的一个重要因素，研究中通过液膜区高度和宽度来表征其与壁面形成的接触面面积大小。溅射率也是高速液滴撞击壁面时的又一重要指标，不同注入速度和入射角度都会引起不同程度的溅射，研究中通过比较汇流的质量流量和注入液滴的质量流量来计算获得。溅射率γ的计算公式[9]为：

$$\gamma=\frac{G_O-G_K}{G_K}\times 100\%\#(5)$$

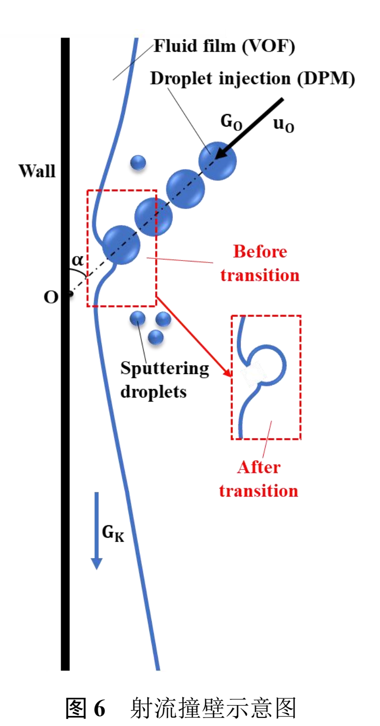


图 6　射流撞壁示意图

Fig.6　Diagram of Jet Impinging on Wall

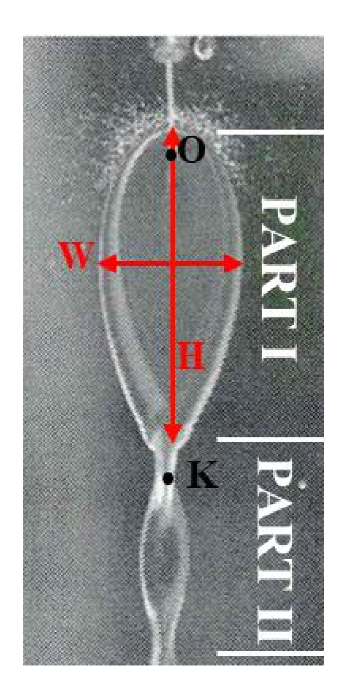


图 7　典型液滴射流撞壁实验效果图[9]

Fig.7　Typical Experimental Image of Droplet Jet Impinging on Wall[9]

3.2　注入速度对液膜特征的影响分析

图 8 为不同注入速度（45°注入，注入速度分别为 3 m/s、5 m/s、8 m/s、10 m/s 和 12 m/s）条件下液滴撞击垂直壁面形成的液膜扩展演变过程。所有液滴具有相同的撞击距离和直径，但由于速度不同，每种情况下液滴的质量流量也有所差异。液滴质量流量的增加直接影响了液膜与壁面的接触面积。

注入速度对液膜形态具有显著影响。在较低注入速度下，形成的液膜光滑，汇流单一且稳定；随着注入速度的增加，液膜扩展速度加快，液接触面积增大。速度增加也会导致液膜表面扰动增加，形成更多的汇流，使液膜形态发生较大变化。这是因为高速液滴撞击壁面形成的液膜具有更高的初始动能，因此液膜区的宽度相比典型情况更大。宽度的增加减弱了表面张力对汇流重力的影响，导致液膜收缩聚拢的节点增多，形成多条汇流。

图 9 显示了 20 ms 时的液膜形态和与壁面的接触面，随着速度增加，接触面积、液膜区高度和宽度均明显增加，其变化趋势如图 10 所示。

另一方面，注入速度的增加也导致液滴的溅射率增加，变化曲线如图 10 所示。较大的注入速度不仅使液滴具有更大的向四周扩散的动能，也增加了垂直于壁面方向的动能，导致更多的液滴溅射，从图 11 的液滴流动曲线图中可以看出。

3.3　入射角度对液膜特征的影响分析

图 12 为不同入射角度（5 m/s 注入，入射角度分别为 30°、45°、60°和 90°）条件下液滴撞击壁面形成的液膜扩展演变过程。入射角度越小，液滴在撞击壁面后竖直方向的速度分量增大，导致汇流流动速度增加。而随着入射角度的增大，液膜速度的竖直分量减小，同时水平方向和垂直壁面方向速度增大。

0ms 1ms 2ms 3ms 4ms 5ms 6ms 7ms 8ms 9ms 10ms 15ms 20ms

(a) 3 m/s

0ms 1ms 2ms 3ms 4ms 5ms 6ms 7ms 8ms 9ms 10ms 15ms 20ms

(b) 5 m/s

0ms 1ms 2ms 3ms 4ms 5ms 6ms 7ms 8ms 9ms 10ms 15ms 20ms

(c) 8 m/s

0ms 1ms 2ms 3ms 4ms 5ms 6ms 7ms 8ms 9ms 10ms 15ms 20ms

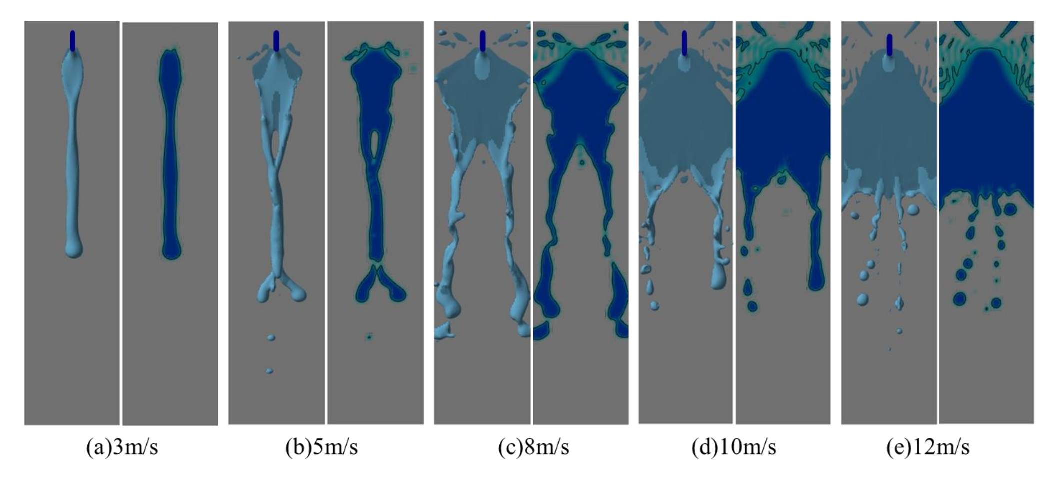
(d) 10 m/s

0ms 1ms 2ms 3ms 4ms 5ms 6ms 7ms 8ms 9ms 10ms 15ms 20ms

(e) 12 m/s

图 8 不同注入速度条件下的液膜特征

Fig.8 Liquid Film Characteristics at Different Injection Rates



(a)3m/s (b)5m/s (c)8m/s (d)10m/s (e)12m/s

图 9 不同注入速度条件下的液膜形态和接触面示意图

Fig.9 Schematic Diagram of Liquid Film Morphology and Contact Surfaces at Different Injection Rates

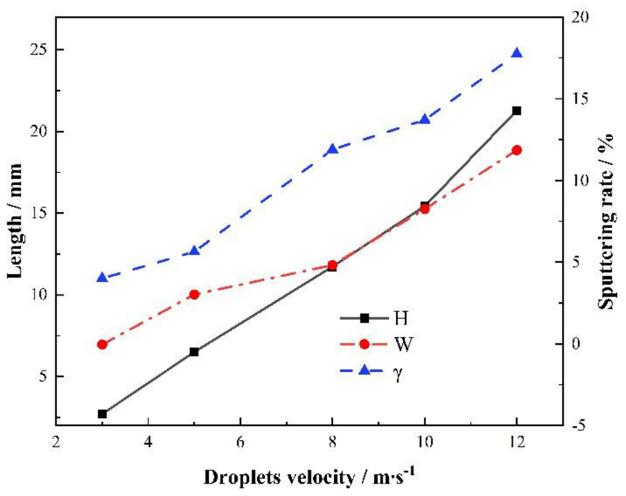


图 10　不同注入速度条件下的液膜特征曲线

Fig.10　Characteristic Curve of Liquid Film at Different Injection Rates

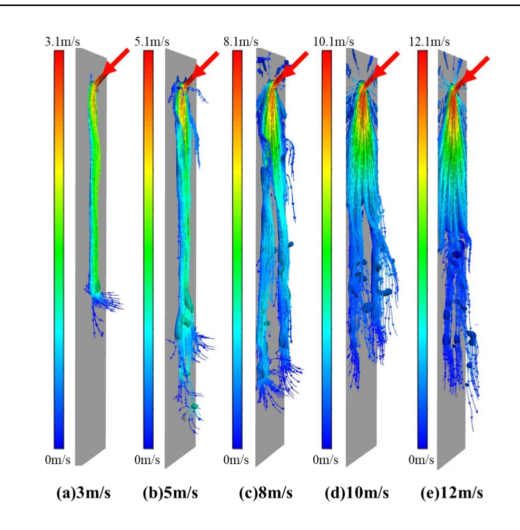


图 11　不同注入速度条件下的液滴流动轨迹示意图

Fig.11　Schematic Diagram of Droplet Flow Trajectory at Different Injection Rates

由图 13 可见，液膜速度分量的变化直接影响了液膜表面的稳定性，使得液膜形态不再规则，并且液膜与壁面的接触面积也发生变化。液膜区宽度随着入射角度的增加而增大，而高度则随着入射角度的增大而减小，如图 14 所示，宽度的增加速率略高于高度的减小速率。

液滴溅射率也随着垂直于壁面的速度分量的增加而增加，如图 15 所示。在较小的入射角度区间，溅射率的增加相对较小，而在较大的区间，增加速率更快。特别是在 90° 入射的情况下，液滴垂直撞击竖直壁面，导致 73.65%的液滴发生反弹、接触壁面后又脱离，使得液滴溅射率远高于其他工况。

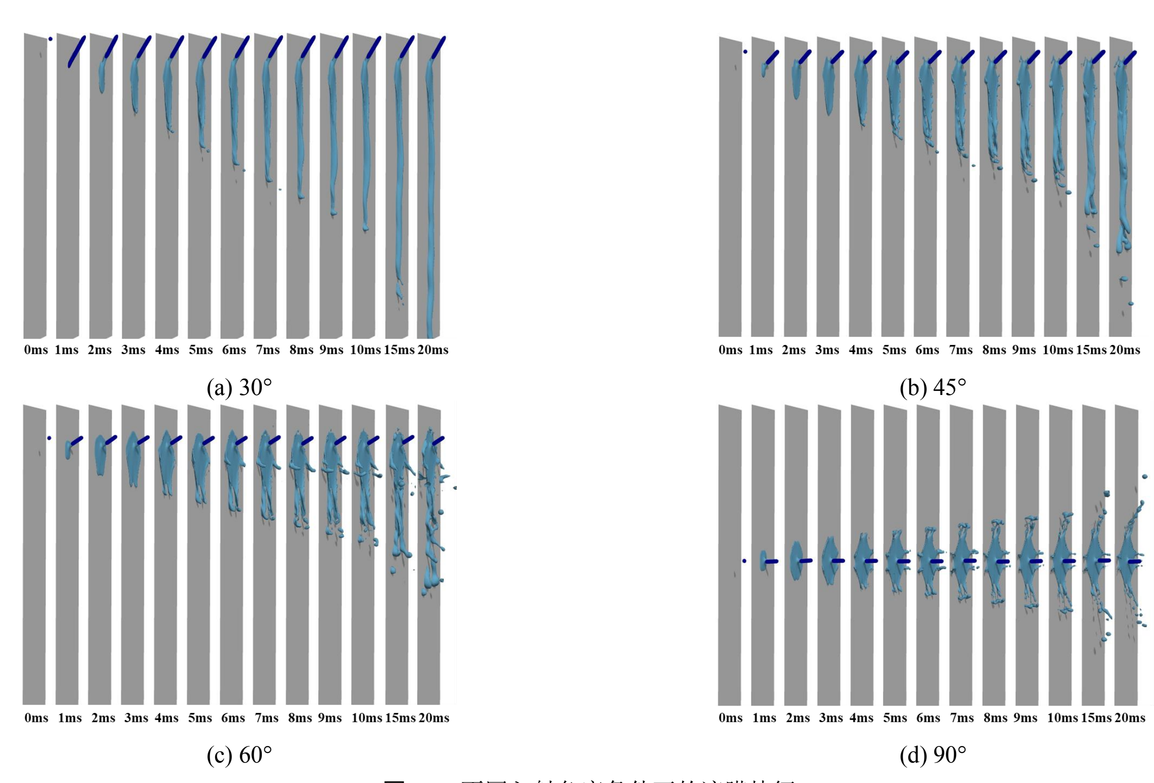


图 12　不同入射角度条件下的液膜特征

Fig.12　Liquid Film Characteristics at Different Incidence Angles

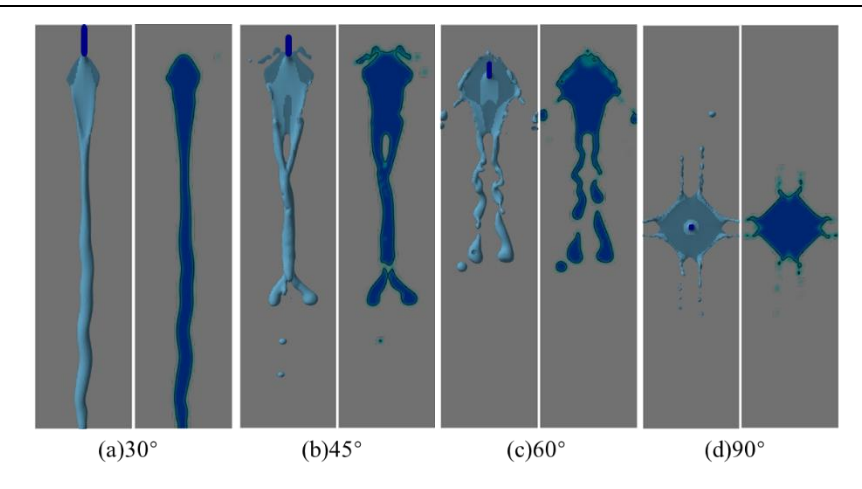


图 13 不同入射角度条件下的液膜形态和接触面示意图

Fig.13 Schematic Diagram of Liquid Film Morphology and Contact Surfaces at Different Incidence Angles

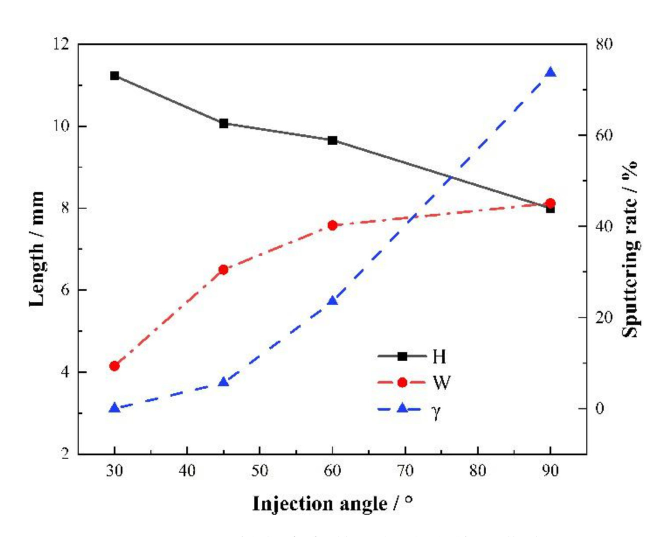


图 14 不同入射角度条件下的液膜特征曲线

Fig.14 Characteristic Curve of Liquid Film at Different Incidence Angles

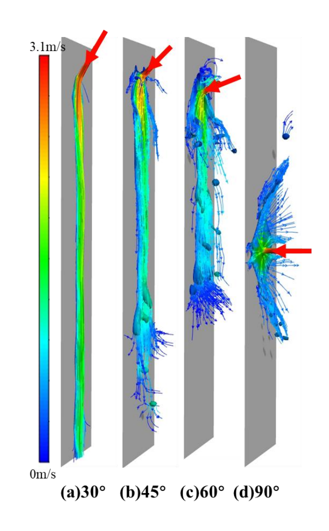


图 15 不同入射角度条件下的液滴流动轨迹示意图

Fig.15 Schematic Diagram of Droplet Flow Trajectory at Different Incidence Angles

不同注入速度和不同入射角度对液膜特征的影响规律与前人研究结果吻合较好。此外，相比于其他的耦合方法，本文研究中采用的 DTV 方法在确保计算精度的前提下，表现出更快的计算速度，能够有效地实现离散相到连续相的耦合。因此，该方法可用于分析和研究液滴射流对壁面、液面以及壁膜的撞击情况。

4 结论

本文采用 DTV 方法对液滴撞击垂直壁面后的液膜扩展和演变过程进行了分析，并研究了注入速度和入射角度对液膜形态和液滴溅射率的影响规律。得到的主要结论如下：

(1)DTV 模型适用于离散液滴撞击壁面、液面、液膜过程的模拟，能够准确计算撞击过程中液膜融合和液膜演变。

(2)增大注入速度有利于液膜的扩展、增大液膜与壁面的接触面积、提高液膜区高度和宽度，但也会增加液滴溅射率。

(3)入射角度对液膜形态有显著影响，增大入射角度能够增大液膜区宽度、减小液膜高度，同时导致液滴溅射率变化速度加快，特别是在 90° 时，73.65%的液滴发生溅射脱离壁面。

在安全壳、稳压器和其他核动力设备表面的喷淋降温过程中，增大液膜与壁面的接触面积是强化降温

的一个手段。液体注入速度和入射角度的调整能够改变液膜形态，建立液滴撞击壁面模型可以为后续耦合传热模型进行喷淋状态下壁面降温研究提供基础。

参考文献

1 Lan Z, Zhu D, Tian W, et al. Numerical approaches and analysis of spray characteristics for pressuriser nozzles[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2014, 92(5): 953-963.

2 Dalili A, Chandra S, Mostaghimi J, et al. Formation of liquid sheets by spraying on a surface[C]. ILASS-Americas, 25th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems.2013.

3 Liu J, Peng K E. Modelling and analysis of initial icing roughness with fixed-grid enthalpy method based on DPM-VOF algorithm[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2021.07.028.

4 刘栋. 液滴碰撞及其融合过程的数值模拟研究[D]. 清华大学, 2014.
LIU Dong. Numerical simulations on collision and coalescence of binary droplets[D]. Tsinghua University, 2014.

5 Zhang Y, Vinay G, Poubeau A, et al. Development of a hybrid Lagrange–Euler transition model for the film formation and dynamics of an impinging liquid spray[J]. Computers & Fluids, 2023.

6 Wang T, Faria D, Stevens L J, Tan J S C, et al. Flow patterns and draining films created by horizontal and inclined coherent water jets impinging on vertical walls[J]．Chemical Engineering Science,2013,102(null).

7 唐亮, 胡锦华, 刘计武等. 倾斜射流撞壁实验研究及液膜几何参数建模[J]. 航空学报,2020,41(12):163-172.
TANG Liang, HU Jinhua, LIU Jiwu, et al. Experimental study on oblique jet wall impingement and geometrical parameter modeling of liquid film[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2020,41(12):163-172.

8 彭振山, 裴毅强, 秦静等. 汽油单液滴撞击不同壁面试验研究[J]. 内燃机工程,2019,40(06):36-42+49. 2019.06.006.
PENG Zhenshan, PEl Yiqiang, QIN Jing, et al. Experimental study on impingement of single gasoline droplet on different substrates[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2019,40(06):36-42+49. 2019.06.006.

9 王慧君. 液体射流撞壁液膜铺展演变特征研究[D]. 华东理工大学, 2024.2023.000035.
WANG Huijun. Study on spreading and development characteristics of liquid film by liquid jet impingement[D]. East China University of Science and Technology,2019,40(06):36-42+49. 2019.06.006.